

# 基于 ABAQUS 组装式地下排涝泵站的动静力分析

李欣娟, 武永新

(天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072)

**摘要:** 随着城市化的快速发展,城市防洪排涝问题日益凸显。针对过去已建排涝泵站建设标准低、排涝能力下降而新建工程周期长、影响景观等问题,提出一种新型组装式地下排涝泵站,不仅施工周期短且具有结构简单、美化环境等优势。结合工程实际应用该新型泵站,基于 ABAQUS 建立三维有限元模型,对其结构进行动静力特性分析。结果表明:组装式地下泵站结构有着良好的力学特性,沉降量小且均匀,应力水平较低,结构受力合理,局部拉应力集中区域须进行适量配筋;分析地震工况下结构位移时程响应,结果表明位移响应值较低,振动幅度较小,结构变形量较小,混凝土损伤范围较小,泵站抗震能力较强。

**关键词:** ABAQUS; 组装式; 地下; 排涝泵站; 静力; 动力

**中图分类号:** TV33; TV312      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1672-643X(2018)01-0138-06

## Static and dynamic analysis of assembled underground drainage pumping station based on ABAQUS

LI Xinjuan, WU Yongxin

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** With the rapid development of urbanization, the problems of urban flood control and drainage have become increasingly prominent. In view of the problem that the existing pumping stations' drainage capability goes down with a low construction standard but a new project takes a long time and affects landscape, this paper proposed a new assembled underground drainage pumping station with the advantages of quick construction, simple structure, and beautification of the environment. With an application example of the new pumping station, the three-dimensional finite-element model was established based on software ABAQUS and the static and dynamic characteristics of the structure were analyzed. The results showed that the new pumping station has good mechanical properties whose structure has good mechanical properties, with small and uniform settlement, low stress level and reasonable structural force. A proper amount of reinforcement is required in the area of tensile stress concentration. The displacement response in seismic conditions is analyzed. The results show that the displacement response value is low, the vibration amplitude is small, the deformation of the structure is small, and the concrete damage is of small range, which indicates that the pumping station has good anti-seismic performance.

**Key words:** ABAQUS ; assembled; underground; drainage pumping station; static; dynamic

## 1 研究背景

随着极端天气的频繁出现和人类活动的影响,城市内涝日益严重,近几年来,许多城市轮番上演“城市看海”的景象,造成严重的洪涝灾害和人员伤亡及财产损失<sup>[1-2]</sup>。过去已建排涝泵站普遍存在排涝标准低、工程老化等问题,尽快扩建新建排涝泵站

成为保障社会安全的迫切要求<sup>[3]</sup>。对于排涝泵站优化设计、运行、机组结构选型等在国内外已经得到广泛的研究<sup>[4-11]</sup>。由于普通排涝泵站施工周期长,体型大,对城市景观有不利影响等,目前已有许多学者提出新型泵站的开发应用,如乔诚等<sup>[12]</sup>提出预制泵站,郭一令等<sup>[13]</sup>提出组装式埋地式污水泵站,钟春红等<sup>[14]</sup>提出模块式预制泵站,这些泵站虽都可以实

收稿日期:2017-09-17; 修回日期:2017-10-14

作者简介:李欣娟(1993-),女,安徽安庆人,硕士研究生,主要从事水工结构仿真、水工建筑物抗震等研究。

通讯作者:武永新(1962-),男,天津人,教授,主要从事水工结构、防洪减灾及数值仿真等研究。

现快速施工且不影响景观,但受材料或技术等限制,其规模很小且造价高,主要适用于城市内小型的雨水泵站。据此,本文提出一种新型组装式地下排涝泵站,旨在解决大流量排涝泵站施工周期长和影响景观的问题,并结合实际工程应用,拟对组装式地下排涝泵站进行三维非线性有限元动静力分析,以为该新型组装式地下排涝泵站建设提供理论基础与参考。

## 2 组装式地下排涝泵站的结构方案

### 2.1 施工方法及结构形式

如图 1、2 所示,新型组装式地下排涝泵站由前池、泵房、压力水箱组成。沿泵站站身顺水流方向开挖 5 道地下连续墙,最外侧两道地下连续墙作为泵房最外侧的墙体和挡土墙,中间 3 道地下连续墙作为泵房隔墙和中墩;进行地基开挖时,5 道地下连续墙作为基坑开挖的支护结构;剩余部件底板、进出水墙板、泵房盖板等采用预制混凝土构件,现场进行快速地组装施工。具体的施工工序为:(1)施工地下连续墙(A、B、C 墙),进行 A、B、C 墙间的地基开挖至泵站底部;(2)对于硬质地基可直接进行后续装配式施工,对于软土地基需先进行地基处理,本文应用案例中采用桩基础,选用 PHC 管桩;(3)使用起吊设备吊装预制混凝土泵站底板,分块装配,接缝处现浇混凝土或做止水接缝处理;(4)通过基础预埋钢筋定位装配进出口墙板,预制构件与现浇结构之间设有预埋杆件;(5)搭设脚手架完成泵房及压力水箱顶板的浇筑;(6)安装钢板 1、钢板 2 于钢板槽 1、2 内,作为前后挡水结构;(7)安装粉碎型格栅加溢流栅拦截粉碎水流中的垃圾;(8)安装进出水管、吊装全贯流潜水泵及机电设备等;(9)吊装泵房预制混凝土盖板。

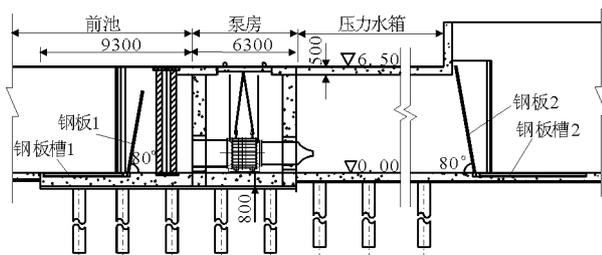


图 1 新型组装式地下排涝泵站剖视图(单位:mm)

其工作原理为:非工作期,钢板 1、钢板 2 分别放置在钢板槽 1、钢板槽 2 内,水泵处于停机状态;工作期,钢板位置不变,启动水泵进行抽水排涝;检修期,钢板 1、钢板 2 向上抬,各旋转 100°,与墙墩内

预埋钢构件咬合,设有橡胶止水条止水,通过钢板挡水,进行泵站的检修;若只需检修水泵则无需上抬钢板,可直接打开盖板将水泵整体吊出进行维修。

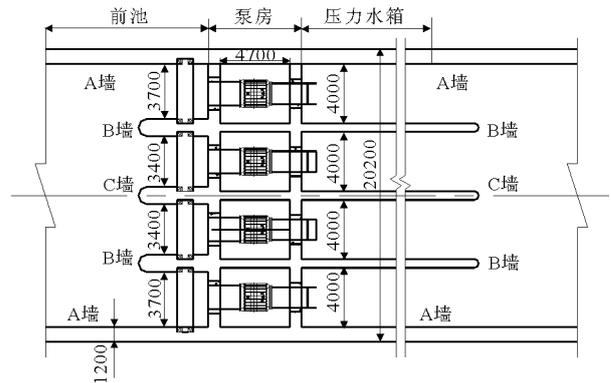


图 2 新型组装式地下排涝泵站平面图(单位:mm)

### 2.2 特征及优势

该新型组装式地下排涝泵站具有以下几点特征及优势:

(1)采用装配与现浇相结合的施工方式,既能继承装配式施工的优点,实现工业化建筑,质量高,施工速度快,缩短工期,节约能源,减少人工作业量,降低劳动力成本,且施工过程中对环境的影响小,符合绿色施工、环境友好原则,又能避免预制率过高造成的成本偏高<sup>[15]</sup>;土建成本节省,减少投资。

(2)采用地下连续墙作为开挖施工时基坑围护结构,其刚度大、强度高、防渗性能好<sup>[16]</sup>;且地下连续墙又作为泵站的永久性建筑物,既提高材料和建筑物利用率,又减少开挖工程量及施工作业面,对周边环境的影响小;免去临时工程的拆建,加快施工进度。

(3)泵站底板、进出水墙、盖板等采用预制混凝土构件,工业化生产,产品质量好精度高;装配式施工快捷,工期短,能实现短期内增建投入使用。

(4)选用全贯流潜水泵,体积小,重量轻,机电合一,能够整体吊入吊出,安装时间短,检修及运行管理方便<sup>[17]</sup>;所需泵房尺寸小,布局紧凑,上、下游闸门采用钢板-钢板槽结构,简单轻便。

(5)所有建筑物均位于地表以下,泵站顶板可作为慢行道或可种植人工草皮,有利于城市生态景观建设。

## 3 有限元模型建立

### 3.1 工程设计

根据海口市某排涝泵站,设计应用该新型组装式地下排涝泵站,依据该区排涝要求,设计泵站结构及尺寸如图 1、2 所示。选用 4 台 1400QGWZ-135

全贯流潜水泵,单台水泵排涝流量为 $5\text{ m}^3/\text{s}$ ,设立独立泵房,长 $4.7\text{ m}$ ,宽 $4\text{ m}$ ,泵站高度 $6.5\text{ m}$ ,泵站垂直水流方向跨度 $20.2\text{ m}$ 。工程为软土地基,选用PHC管桩,入土深度 $25\text{ m}$ ,挡土墙及墩墙厚 $1.2\text{ m}$ ,隔墙厚 $0.6\text{ m}$ ,前后进出水墙厚 $0.8\text{ m}$ ,底板厚 $0.8\text{ m}$ ,顶板厚 $0.5\text{ m}$ ;设计该工程开挖后两侧地下连续墙入土深度为 $7\text{ m}$ ,考虑中间地下连续墙开挖后上部两侧均不承受土压力,优化其入土深度为 $4\text{ m}$ 。

### 3.2 模型建立

以工程所处地质条件、设计的结构、桩基础以及周边环境作为依据,基于ABAQUS有限元软件建立三维有限元计算模型。模型顺水流方向沿泵房出水口向上取 $15.6\text{ m}$ ,垂直水流方向宽度为 $20.2\text{ m}$ ,考虑桩基础,土层厚度 $50\text{ m}$ ,垂直水流方向左右各向外取土 $16\text{ m}$ ,顺水流方向上下各取土 $10\text{ m}$ ,以考虑地基土的影响。土体及泵站结构选用C3D8R实体单元进行网格划分,泵站单元总数为 $23\ 800$ 个,土体单元总数为 $47\ 832$ 个,PHC管桩采用杆单元模拟,有限元网格模型见图3。

模型边界条件如下:选用直角坐标系,以底板与进水口墙外侧相交中点为原点,x轴为顺水流向下方向,y轴为垂直水流方向,z轴竖直向上,地基底部施加三向约束,四周加水平约束,以考虑周围土体的约束作用;为了合理模拟泵站结构受力状态,考虑实际求解中的非线性问题,模型中土体采用弹塑性本构,在同一土层单位为各向同性材料,假定土体符合摩尔-库伦准则;泵站结构混凝土假定为弹塑性材料,采用混凝土弹塑性本构;泵站结构与土接触面设置为摩擦接触,有限滑移,摩擦系数为 $0.5$ ;桩基础嵌入地基,桩基础与底板底部绑定约束,底板与地基之间设置面与面的接触,有限滑移,摩擦系数为 $0.5$ 。

### 3.3 材料参数及各工况计算荷载

参考实测勘察报告,工程地质土层划分为5层,结构材料选用C30混凝土,各土层及结构计算力学参数如表1所示;各工况下计算荷载如表2所示。

表1 数值计算力学参数

岩土分层	$\rho/(g \cdot \text{cm}^{-3})$	$E/\text{MPa}$	$\nu$	$C/\text{kPa}$	$\varphi/(\circ)$
(1)	1.68	9.28	0.30	14.3	10.1
(2)	1.88	20.68	0.30	37.0	15.2
(3)	1.73	18.24	0.30	31.5	16.4
(4)	1.80	19.32	0.30	35.3	20.6
(5)	1.81	25.28	0.30	28.5	25.0
混凝土	2.50	30000	0.17		

表2 计算荷载

工况	上游水位/m	下游水位/m	荷载				
			自重	水重	扬压力	静水压力	土压力
完建	无水	无水	√				√
运行	5.00	7.47	√	√	√	√	√

## 4 组装式地下排涝泵站的动静力分析

### 4.1 组装式地下排涝泵站的静力特性分析

组装式地下排涝泵站在自重、土压力、水压力等荷载作用下结构会产生一定的沉降,泵站各工况下沉降位移分布图见图4。计算结果表明:泵站在各工况下整体沉降均匀,且沉降量处于很低的水平。最大沉降量为 $21.74\text{ mm}$ ,发生在完建工况的泵房顶板处,这是由于完建期的沉降是由结构在重力作用下底板对地基的压力所产生,泵房位置处的结构自重最大;运行期最大沉降位移为 $19.42\text{ mm}$ ,位于前池挡土墙,完建期、运行期最小沉降量分别为 $17.67$ 、 $16.81\text{ mm}$ ,最大沉降差为 $4.07\text{ mm}$ ,满足规范要求<sup>[18]</sup>。由图4可以看出,完建工况泵站沉降量顺水流方向从上到下逐渐增加,而运行工况沉降量顺水流方向从上到下逐渐减小,且运行工况泵站整体沉降量小于完建工况,分析其原因在于运行期泵站下游水位高于上游水位,上下游水位差在泵站底板产生竖直向上的扬压力,扬压力大小沿水流方向逐渐增大,削弱了结构对地基的压力。

图5为组装式地下排涝泵站在不同工况下的压应力分布图。由图5可知,泵站压应力分布均匀,完建工况和运行工况的最大压应力分别为 $2.56$ 、 $2.67\text{ MPa}$ ,均位于进水口墙体圆孔斜向 $-45^\circ$ 角边界点,圆孔附近的进水口墙体压应力也相对较高;根据计算结果显示:底板与地基接触面也存在局部压应力集中,这是因为模型中采用杆单元模拟PHC管桩,桩与底板接触的部位容易出现应力集中。结构整体受压水平较低,最大压应力远小于混凝土压应力允许设计值 $14.3\text{ MPa}$ <sup>[19]</sup>,这是因为结构轻巧,产生的压力较小。

图6为组装式地下排涝泵站在不同工况下的拉应力分布图。由图6可知:完建工况和运行工况拉应力分布相似,完建工况最大拉应力略大于运行工况,最大拉应力为 $2.00\text{ MPa}$ ,略超过混凝土拉应力允许设计值 $1.43\text{ MPa}$ <sup>[19]</sup>。出现在泵房内底板边缘与最外侧墙的相交点,这是由于墙外土体地面高程高于墙内地基土,墙外土体对结构产生主动土压力,墙内地基

土对墙产生被动土压力,底板边缘与墙体相交,对墙体有顶撑作用,使得拉应力在此处集中;同时最外侧 A 墙体在此处受弯,底板附近最外侧墙体的靠外土体侧 3~4 m 内拉应力水平偏高,泵站局部拉应力集中区域需进行适量的配筋以满足强度要求。

#### 4.2 组装式地下排涝泵站的 结构地震响应分析

分析结构在地震特殊工况下的稳定性,本次计算选取 EL Centro 实测地震波包含最大峰值的 0~

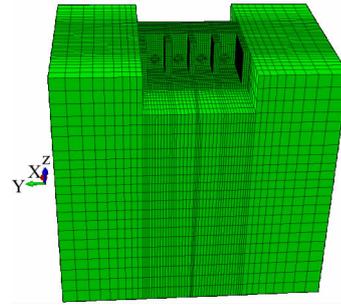


图 3 三维有限元网格模型

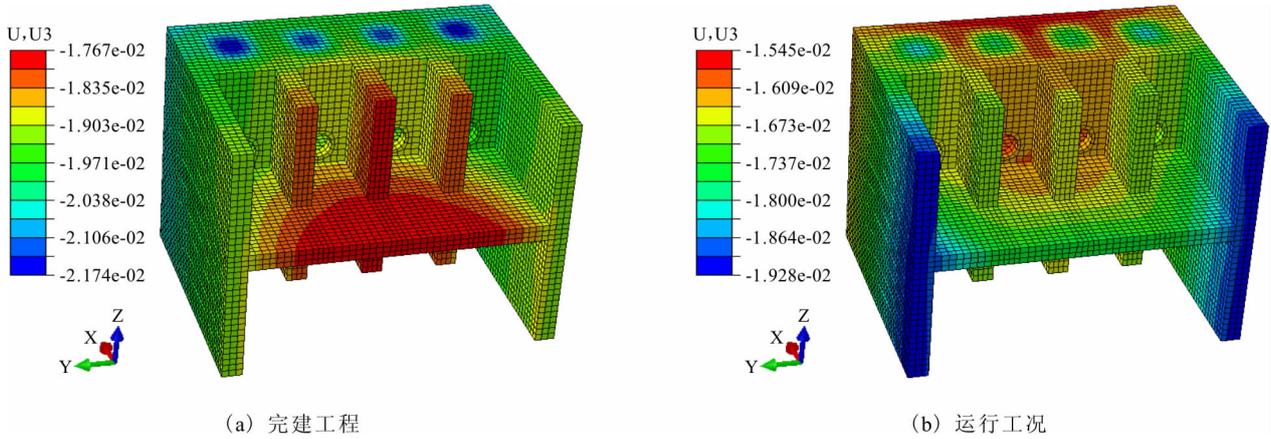


图 4 各工况下泵站沉降位移云图(单位:m)

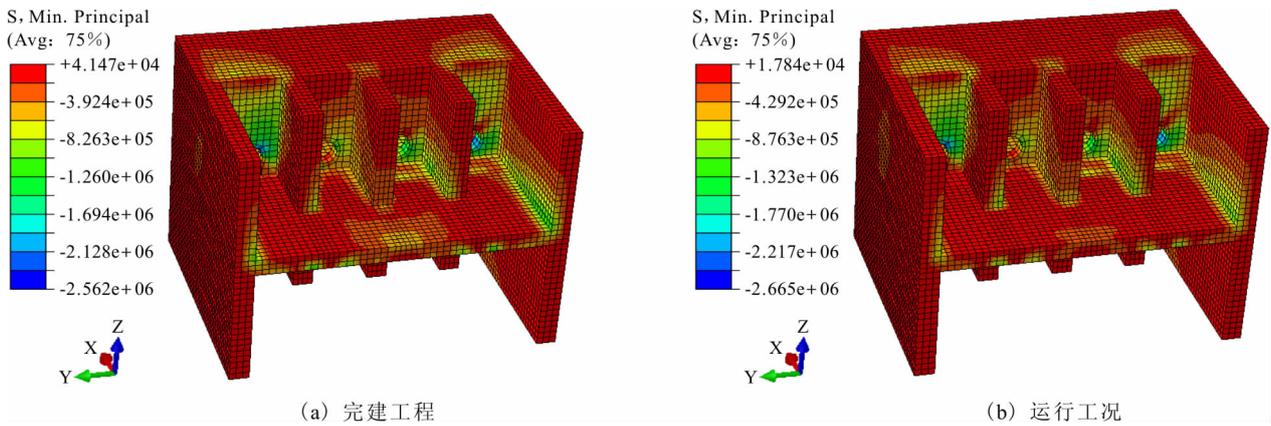


图 5 各工况下泵站压应力云图(单位:Pa)

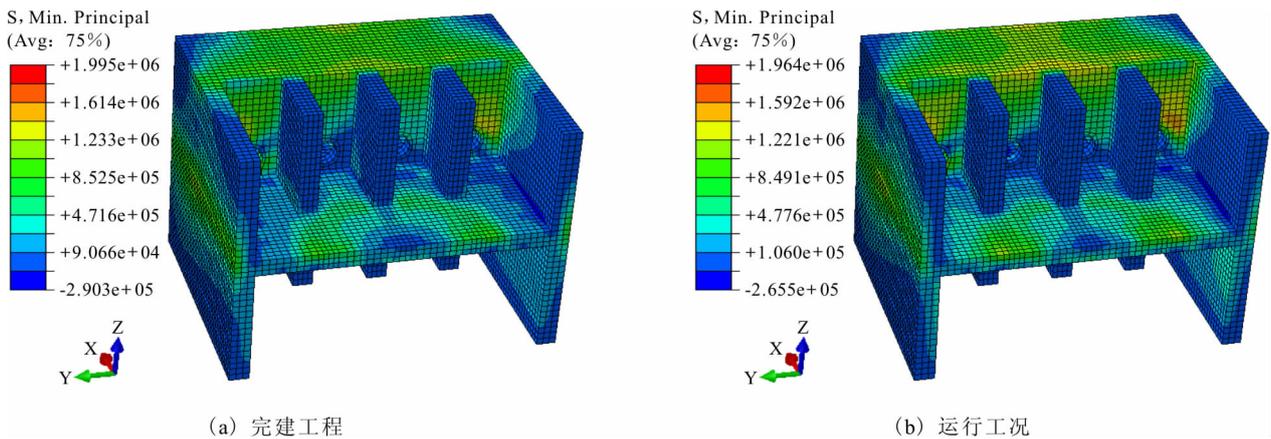


图 6 各工况下泵站主拉应力云图(单位:Pa)

20 s 共 1 000 个加速度记录输入地震时程曲线,研究运行工况和地震作用组合工况下的动力响应。由于地基土对结构有一定的约束和稳定作用,因此高程越大,越是靠近上部的结构地震响应位移越大,分别选取泵站最高点位置泵房顶板和最低点位置底板作为分析对象,分别得到顶板和底板各方向位移响应曲线如图 7 和 8 所示。由图 7 和 8 可知,泵站顶板振动位移大于底板,结构在竖直向振动幅度较水平向弱;整体上振动幅度较小,结构在地震响应下产

生的动位移处于较低水平范围内;结构整体变形量小,地震作用下结构最大位移为 25.33 mm,满足水工建筑物抗震设计规范<sup>[20]</sup>的要求。

分析泵站混凝土结构在地震下的损伤破坏情况,基于混凝土塑性损伤模型得到泵站在地震工况下的塑性损伤分布如图 9 所示,由图 9 可知在地震作用下结构材料破坏主要发生在前池底板与进水口处墙体,破坏集中的范围较小,未出现明显的损伤贯通区,结构整体抗震能力较强。

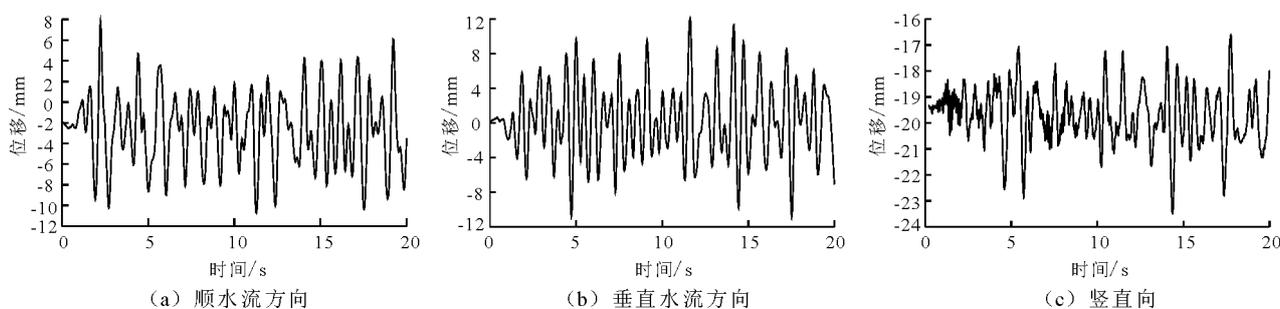


图 7 泵房顶板位移时程曲线

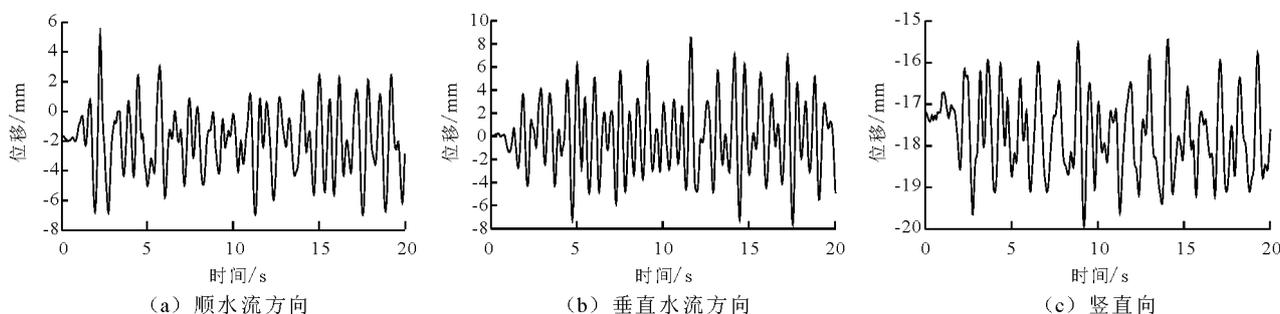


图 8 泵房底板位移时程曲线

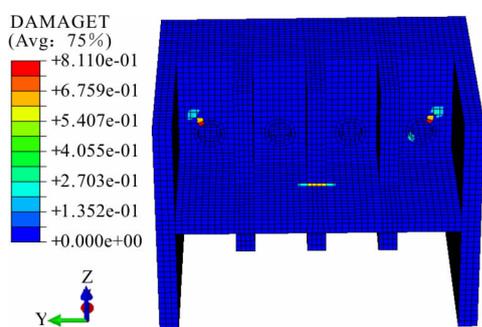


图 9 地震工况下泵站最终损伤分布图

## 5 结 论

(1) 基于 ABAQUS 对组装式地下排涝泵站结构动静力特性进行三维非线性有限元分析,结果表明:各工况下结构沉降量较小,沉降均匀;结构受力合理,应力分布均匀,最大压应力为 2.67 MPa,远小于混凝土抗压强度设计值;最大拉应力为 2.00 MPa,

局部拉应力略超过混凝土抗拉强度设计值,须进行适量配筋。

(2) 分析组装式地下排涝泵站在地震特殊工况下的动力响应,结果表明结构地震动力响应值较低,振动幅度较小,各方向上产生的位移水平较低,整体变形量较小,结构较为稳定;地震工况下结构损伤范围较小,抗震能力较强。

(3) 与普通泵站相比,新型组装式地下排涝泵站采用地下连续墙结构,混凝土现浇与装配式施工相结合的方式,使得结构施工简单迅速,且建筑物均位于地下,有利于环境美观,通过动静力分析得到该新型组装式泵站结构设计合理,工程具有良好的实用性。

## 参考文献:

[1] 张建云,王银堂,贺瑞敏,等. 中国城市洪涝问题及成因

- 分析[J]. 水科学进展,2016,27(4):485-491.
- [2] 张建云,王银堂,刘翠善,等. 中国城市洪涝及防治标准讨论[J]. 水力发电学报,2017,36(1):1-6.
- [3] 陈建,李琪,许建中,等. 中国泵站工程现状及“十一五”期间泵站更新改造任务[J]. 水利水电科技进展,2008,28(2):84-88.
- [4] PLANELLS P, CARRIÓN P, ORTEGA J F, et al. Pumping selection and regulation for water - distribution networks [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2005,131 ( 3 ) : 273 - 281.
- [5] 朱红耕,袁寿其. 大型泵站进水流道技术改造优选设计[J]. 水力发电学报,2006,25(2):51-55.
- [6] WESTHUIZEN W V D, CATTART T. Power station pump selection: part 1 [J]. World Pumps, 2009,2009(519):16-19.
- [7] WESTHUIZEN W V D, CATTART T. Power station pump selection: part 2 [J]. World Pumps, 2010,2010(1):14-17.
- [8] 陆林广,陈坚,梁金栋,等. 灯泡贯流泵装置的优化水力设计[J]. 水利学报,2008,39(3):355-360.
- [9] 冯晓莉,仇宝云,黄海田,等. 南水北调东线江都排灌站优化运行研究[J]. 水力发电学报,2008,27(4):130-134.
- [10] 冯晓莉,仇宝云,杨兴丽,等. 调水兼顾排涝的贯流泵站机组及工况调节方式定量选择[J]. 水力发电学报,2012,31(6):271-276.
- [11] 刘静森,程吉林,龚懿. 城镇圩区排涝泵站群日常运行方案优化[J]. 农业工程学报,2014,30(17):141-148.
- [12] 乔诚,杨志勇,曹杨华. 预制泵站:中国,201310279861.3[P]. 2015-01-14.
- [13] 郭一令,王萍,贾卫利. 组装地埋式污水泵站:中国,201220635392.5[P]. 2012-11-27.
- [14] 钟春红,郑恒利. 模块式预制泵站:中国,201320131109.X[P]. 2013-03-22.
- [15] 王俊,赵基达,胡宗羽. 我国建筑工业化发展现状与思考[J]. 土木工程学报,2016,49(5):1-8.
- [16] 徐中华,王建华,王卫东. 上海地区深基坑工程中地下连续墙的变形性状[J]. 土木工程学报,2008,41(8):81-86.
- [17] 古智生. 全贯流潜水电泵的开发与应用[J]. 水利水电技术,2010,41(12):54-57.
- [18] 中华人民共和国水利部. GB/T 50265-97 泵站设计规范[S]. 北京:中国计划出版社,1997.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50010-2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [20] 中华人民共和国水利部. DL 5073-2000 水工建筑物抗震设计规范[S]. 北京:中国电力出版社,2000.

(上接第 137 页)

- [2] 石长伟. 三门峡水库运用方式对陕西库区的影响及治理对策[C]//第八届全国泥沙基理论学术讨论会论文集. 南京:河海大学出版社,2011.
- [3] 石长伟,张智,王亚梅,等. 潼关高程变化及其对渭河下游的影响分析[J]. 水资源与水工程学报,2016,27(6):125-129.
- [4] 胡一三,张金良,钱意颖. 三门峡水库运用方式原型试验研究[M]. 郑州:黄河水利出版社,2009.
- [5] 王平,姜乃迁,侯素珍,等. 三门峡水库原型试验冲淤效果分析[J]. 人民黄河,2007,29(7):22-24.
- [6] 姜乃迁,李文学,张翠萍,等. 黄河潼关河段清淤关键技术研究[M]. 郑州:黄河水利出版社,2004.
- [7] 林秀芝,姜乃迁,田勇. 黄河三门峡库区东垆湾裁弯对潼关高程影响的分析[J]. 水利水电技术,2004,35(8):14-16.
- [8] 武彩萍,李远发. 黄河小北干流放淤模型试验研究[M]. 郑州:黄河水利出版社,2007.
- [9] 石长伟,张英,毕银霞. 2009年桃汛期调水调沙对潼关高程的影响[J]. 人民黄河,2012,32(12):66-67+70.
- [10] 潼关高程控制与三门峡水库运用方式研究项目组. 潼关高程控制与三门峡水库运用方式研究[R]. 郑州:黄河水利科学研究院,2005.
- [11] 石长伟,王凯,毕银霞,等. 渭河临渭区河段砂石资源勘查分析[R]. 西安:陕西秦安河流研究所,2007.
- [12] 石长伟,曹绮欣,董倩,等. 渭河砂石资源分布及采砂河道影响分析[R]. 西安:陕西省河流工程技术研究中心,2014.
- [13] 刘涛,石长伟. 渭河下游临渭区河段砂石资源贮量分析[J]. 水资源与水工程学报,2014,25(2):233-236.
- [14] 冯普林,石长伟,张广林. 渭河“2003”洪水灾害及其减灾措施的分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2004,2(1):44-53+64.